

Traitement du signal et Apprentissage profond ; applications industrielles

Thomas COURTAT

thomas.courtat@thalesgroup.com

Master MVA 2022



1 Signal et communications

- Généralités
- Émission
- Propagation
- Réception

Signal et communications

Généralités

Signal bande étroite

Un signal réel x est dit à bande étroite s'il s'écrit

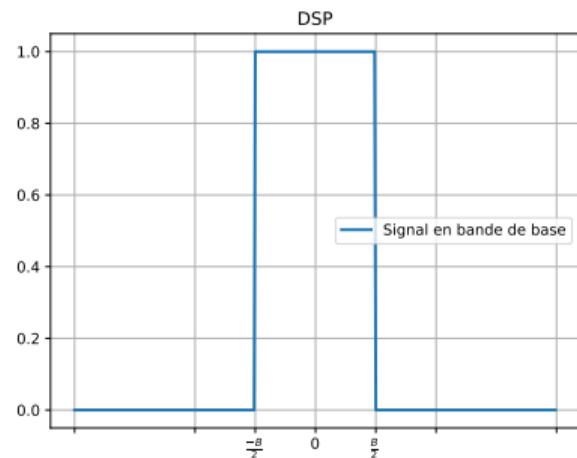
$$x(t) = x_B(t) \cdot \cos 2\pi f_0 t + \varphi$$

avec $\text{DSP}(x_B) \subset [-\frac{B}{2}, \frac{B}{2}]$ et $B \ll f_0$.

- B : largeur de bande
- f_0 : fréquence porteuse
- x_B : signal en bande de base

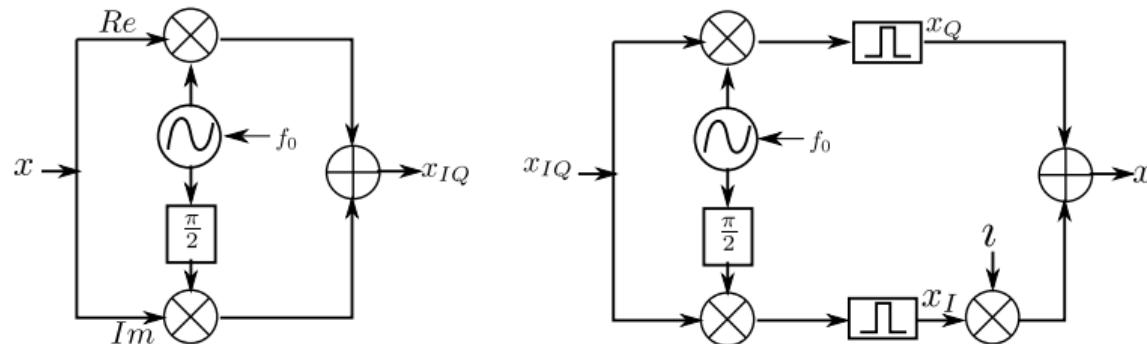
On note $\mathcal{B}(x)$ la largeur de bande du signal x

Définition similaire pour $x = x_B(t) \cdot e^{2\pi f_0 t}$ signal complexe



Modulation et démodulation IQ

Si x_I et x_Q sont des signaux réels à bande étroite en bande de base alors le signal complexe $x = x_I + ix_Q$ peut être transmis et reçu selon le schémas:

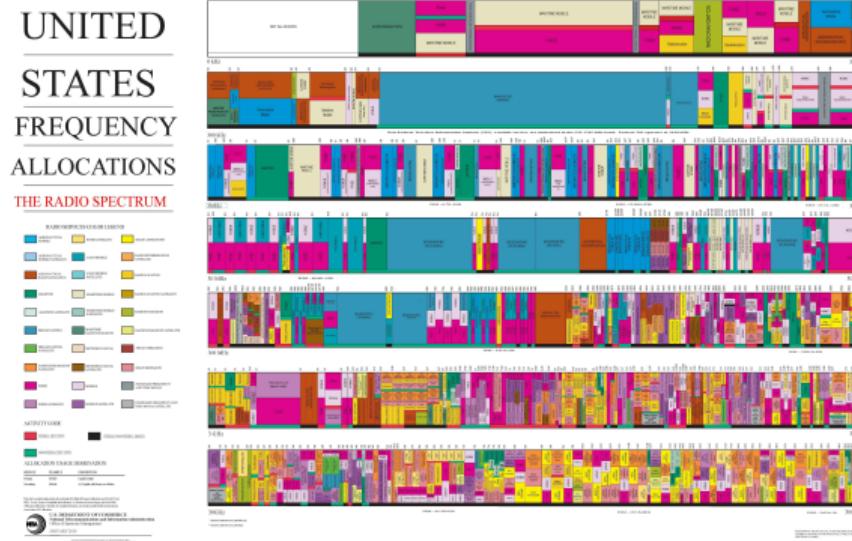


⇒ En télécommunications, les données sont isomorphes aux nombres complexes.

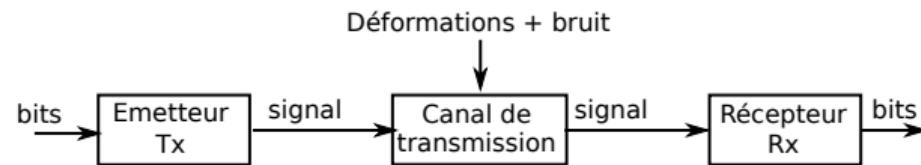
Multiplexage fréquentiel

Les signaux de communication sont des signaux en bande étroite transposés à différentes fréquence.

Un signal est séparé des autres par filtrage autour de sa fréquence centrale.



Synoptique chaîne de transmission

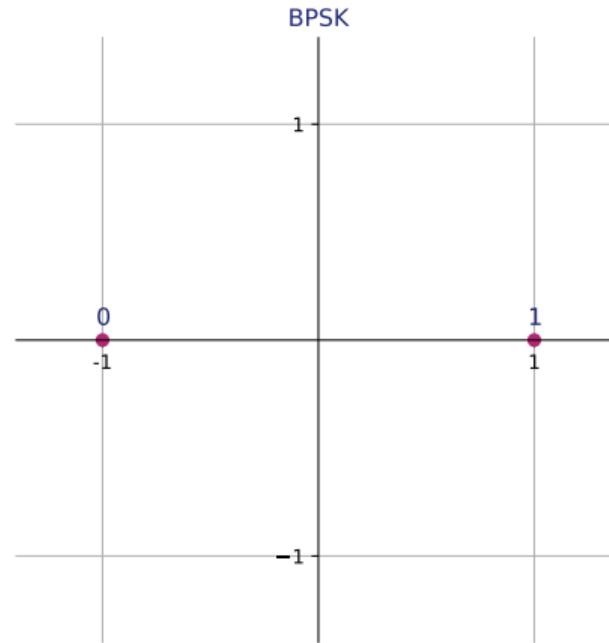


Émission

Codage n-aire de l'information

Source d'information \simeq suite uniforme indépendante de 0,1.

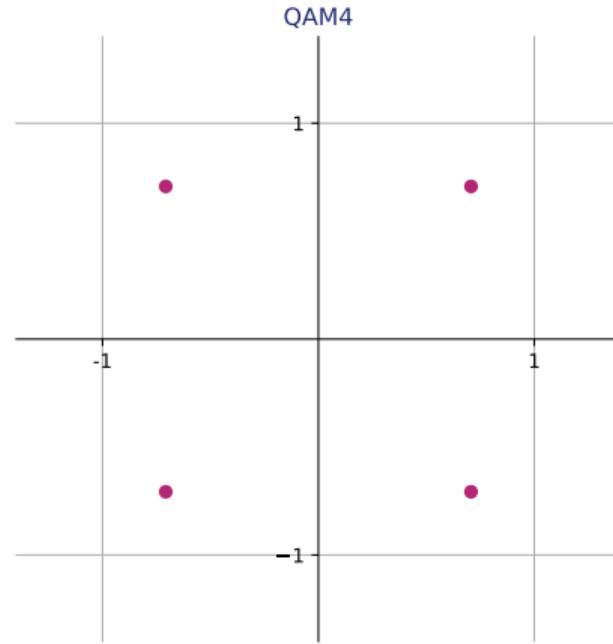
1 0 1 1 0 1 0 0 0 1



Codage n-aire de l'information

Source d'information \simeq suite uniforme indépendante de 0,1.

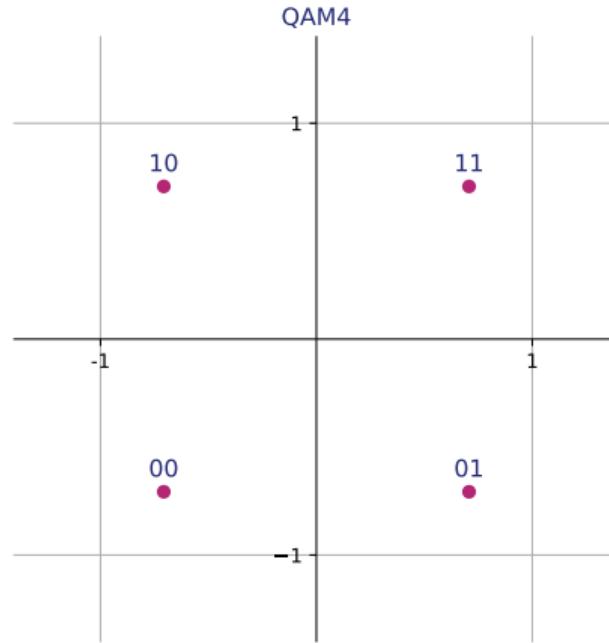
1 0 1 1 0 1 0 0 0 1



Codage n-aire de l'information

Source d'information \simeq suite uniforme indépendante de 0,1.

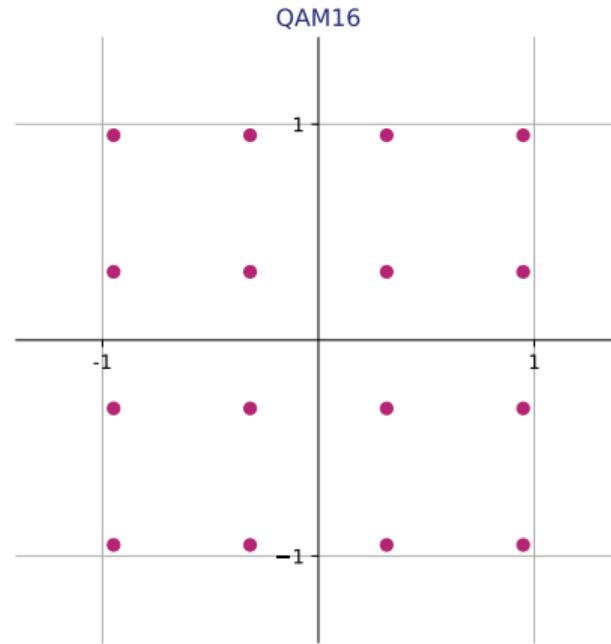
1 0 1 1 0 1 0 0 0 1



Codage n-aire de l'information

Source d'information \simeq suite uniforme indépendante de 0,1.

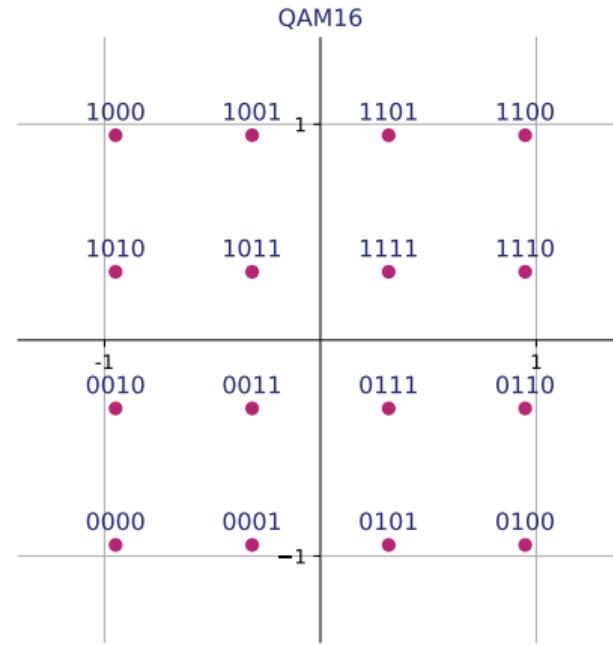
1 0 1 1 0 1 0 0 0 1



Codage n-aire de l'information

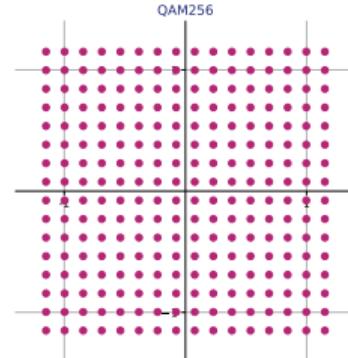
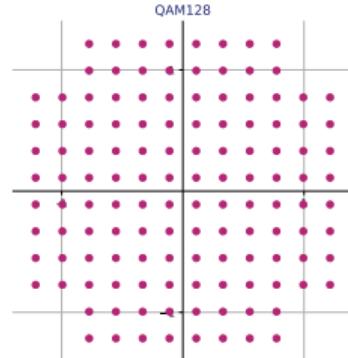
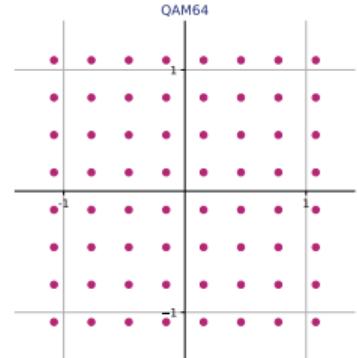
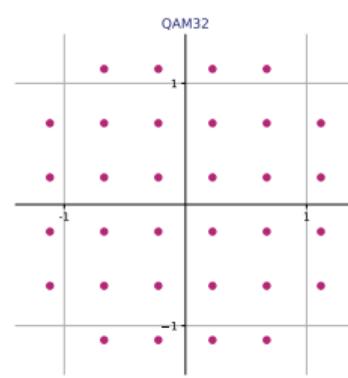
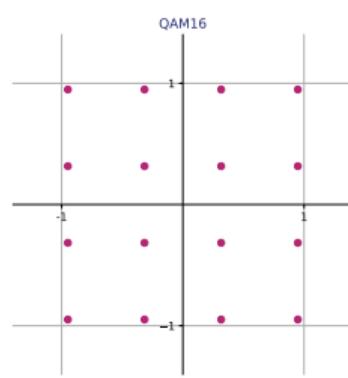
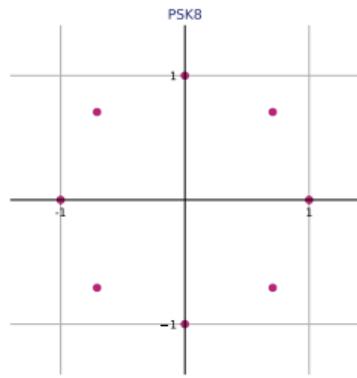
Source d'information \simeq suite uniforme indépendante de 0,1.

1 0 1 1 0 1 0 0 0 1



TCodage n-aire de l'information

Modulations



Mise en trame

Pour faciliter la réception, en émission, les données utiles sont multiplexées à des:

- séquences d'identification
- séquences de synchronisation
- séquences pilotes

Ces séquences sont connues de l'émetteur ET du récepteur.

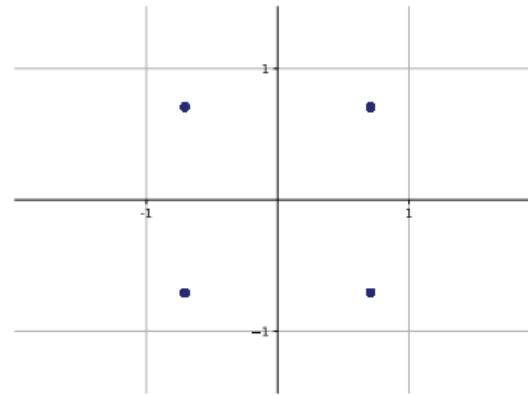
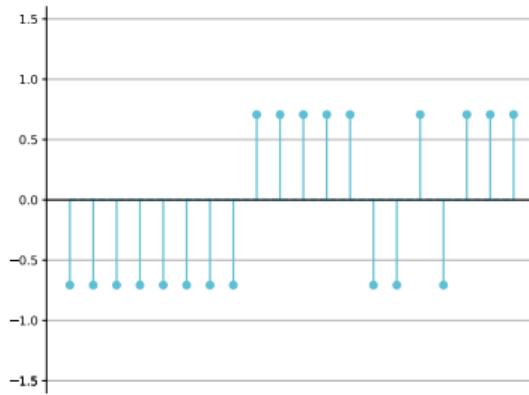
L'alternance entre séquences pilotes et données se fait selon un schéma de trame connu.



Mise en rythme

Les symboles sont disposés dans le temps écartés d'une durée T appelée *temps symbole*.

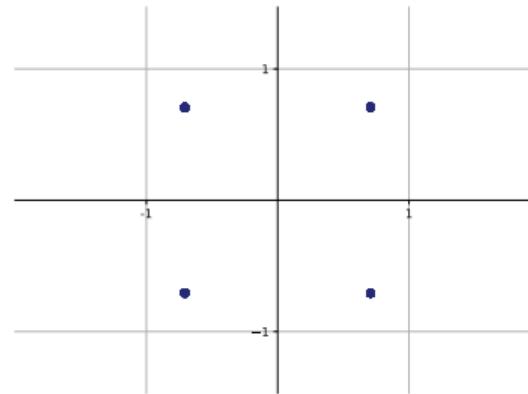
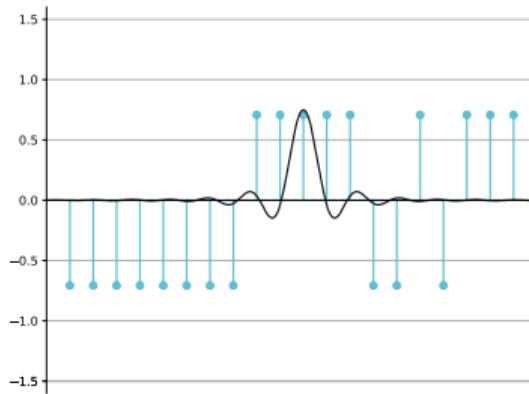
$$s(t) = \sum a_i \delta_{iT}$$



Mise en forme continue

Puis on utilise un filtre h pour *mettre en forme le signal*

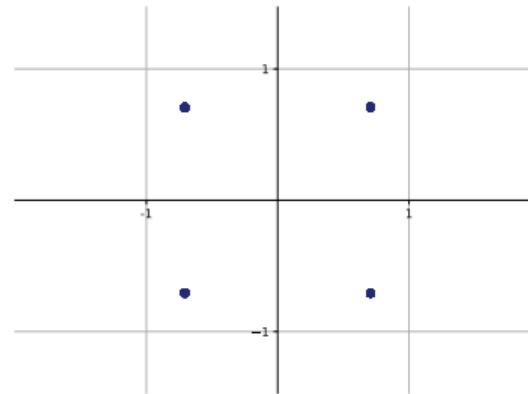
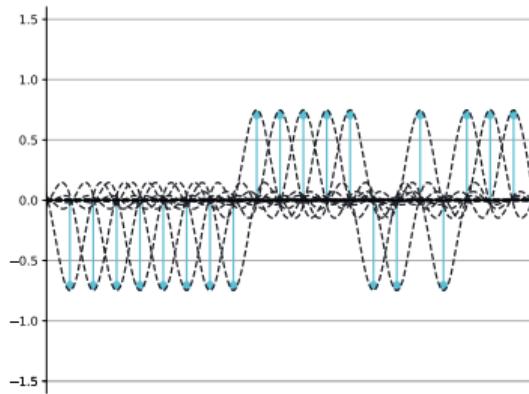
$$s(t) = \sum a_i h(t - iT)$$



Mise en forme continue

Puis on utilise un filtre h pour *mettre en forme le signal*

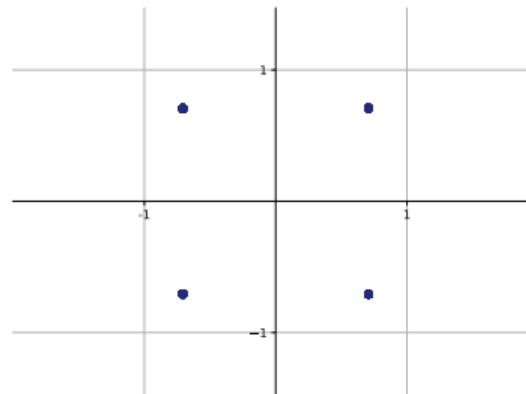
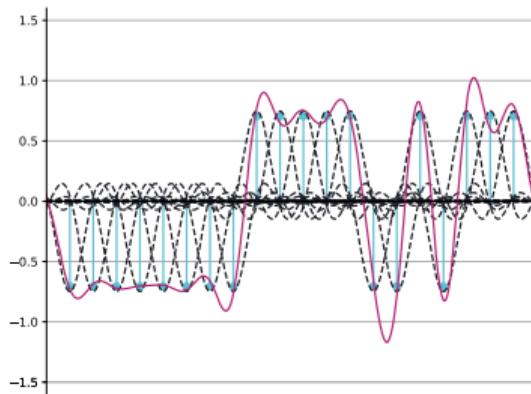
$$s(t) = \sum a_i h(t - iT)$$



Mise en forme continue

Puis on utilise un filtre h pour *mettre en forme le signal*

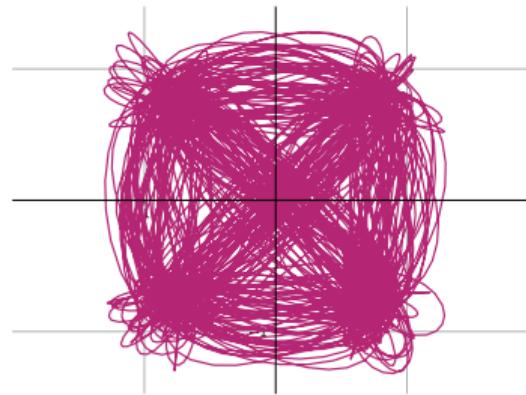
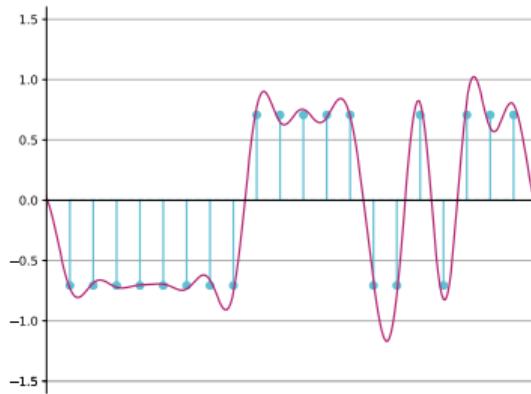
$$s(t) = \sum a_i h(t - iT)$$



Mise en forme continue

Puis on utilise un filtre h pour *mettre en forme le signal*

$$s(t) = \sum a_i h(t - iT)$$

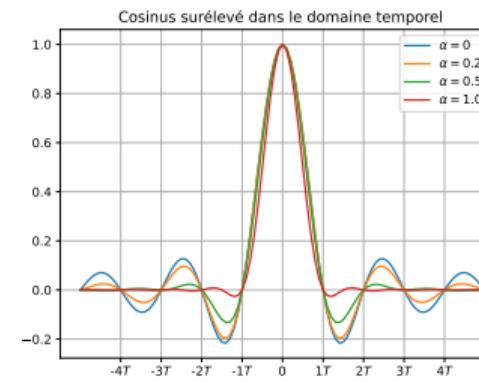
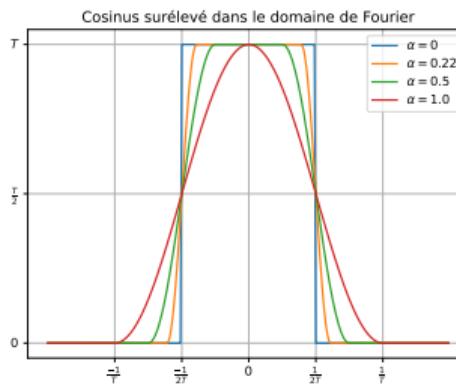


Mise en forme continue

Filtres en Cosinus Surélevé

On note f le filtre en cosinus surélevé et F sa transformée de Fourier.
On note $\alpha \in [0, 1]$ le *roll-off* de ce filtre.

$$F(f) = \begin{cases} T & \text{si } |f| \leq \frac{1-\alpha}{T} \\ \frac{T}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{\pi T}{\alpha} \left(|f| - \frac{1-\alpha}{2T} \right) \right) \right) & \text{si } \frac{1-\alpha}{T} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{T} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$



$$f(t) = \operatorname{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos \frac{\pi \alpha t}{T}}{1 - \left(\frac{2\alpha t}{T}\right)^2}$$
$$\Rightarrow f(t) = O(1/t^3)$$

$$f(0) = \int F(f) df = 1$$
$$\int f(t) dt = F(0) = T$$
$$f(kT) = 0 \quad k \text{ entier } \neq 0$$

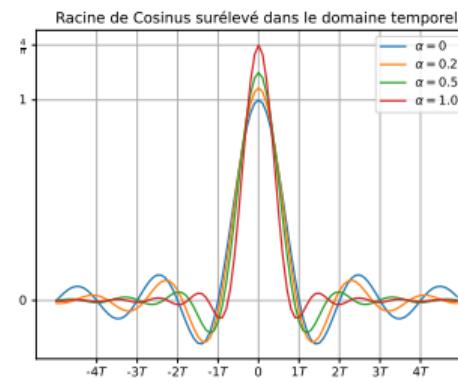
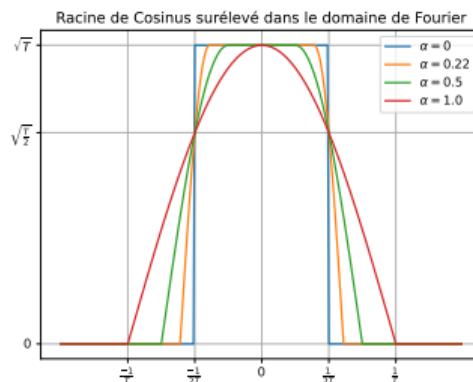
Mise en forme continue

Filtres en Racine de Cosinus Surélevé

On note g le filtre en cosinus surélevé et G sa transformée de Fourier.

On note $\alpha \in [0, 1]$ le *roll-off* de ce filtre.

g est défini par $G(f) = \sqrt{F(f)}$.



$$g(0) = \left(1 + \alpha\left(\frac{4}{\pi} - 1\right)\right)$$

$$g(t) = O(1/t^2)$$

$$\int g(t)^2 dt = F(0) = T$$

$$g(kT) \neq 0 \text{ en général}$$

Transposition en fréquence

Si le filtre de mise en forme est un Racine de Cosinus Surélevé, la DSP du signal est la Transformée de Fourier du Cosinus surélevé.

Pour se propager un signal doit être porté par une onde.

⇒ $x \rightarrow x \cdot e^{2\pi i f_0 t}$ avec f_0 la fréquence porteuse.

Propagation

Effets du canal de transmission

Le canal de transmission induit une suite d'échos:

$$s_{\text{reçu}}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i e^{i\varphi_i} s(t - \tau_i)$$

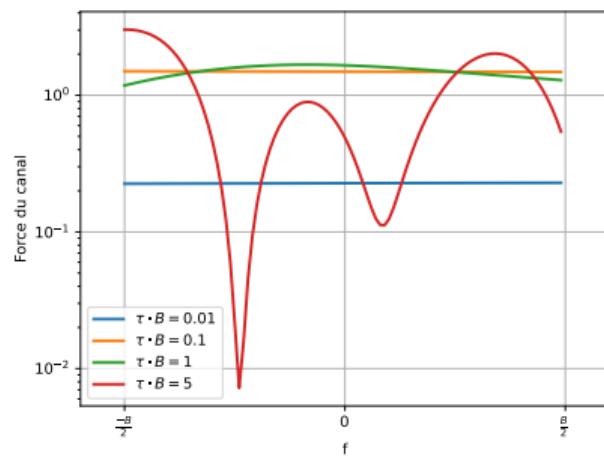
$\tau = \max_{ij} |\tau_i - \tau_j|$: étalement du canal

Si $\frac{1}{B(x)} < \tau$: canal plat

- Pas de déformation du signal
- Se traduit sur le SNR

Si $\frac{1}{B(x)} > \tau$: canal à évanouissements

- Variations puissance / fréquence
- Déformation du signal
- Interférences entre symboles



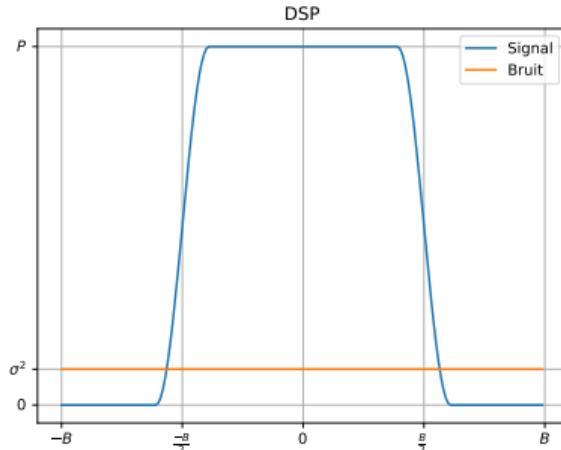
Effets du canal de transmission

Le canal de transmission ajoute du bruit:

$$s_{\text{reçu}}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i e^{i\varphi_i} s(t - \tau_i) + \eta(t)$$

avec $\eta(t)$ bruit gaussien complexe de variance σ^2 :

- $\eta(t) = \eta_I(t) + i\eta_Q(t)$
 - $\eta_I(t) \sim \mathcal{N}(0, \frac{\sigma^2}{2})$
 - $\eta_Q(t) \sim \mathcal{N}(0, \frac{\sigma^2}{2})$
 - $\eta_I(t)$ et $\eta_Q(t)$ sont indépendants
- Le bruit est blanc dans la bande du signal
 - Sa DSP est plate sur $[-\frac{B}{2}, \frac{B}{2}]$
 - Si $|t_0 - t_1|B \gg 1$, $\eta(t_1)$ et $\eta(t_2)$ sont indépendants



Réception

En réception, l'objectif est de retrouver le flux de bits émis et pour cela:

- Recevoir, filtrer et transposer en bande de base le signal (analogique)
- Numériser le signal
- Réduire l'effet du bruit
- Se synchroniser
- Corriger l'effet du canal (égalisation)
- Estimer les symboles émis puis en déduire les bits.

Filtrage optimal

On reçoit $y(t) = x(t) + n(t)$, on suppose qu'on connaît la DSP de x et celle de n et que x et n sont indépendants.

Quel est le filtre linéaire f à appliquer à y tel que le SNR soit maximal ?

$$\text{SNR} = \frac{\int F^2 X}{\int F^2 \sigma^2}$$

$$\text{SNR} \leq \frac{\int F^2 \int X^2}{\sigma^2 \int F^2} \quad \text{eg ssi } F^2 \propto X^2$$

⇒ On prend donc $F = \text{DSP}x$

Si x suite de symboles mise en forme par un racine de cosinus surélevé, alors f est un racine de cosinus surélevé et le filtre de mise en forme résultant en réception est un cosinus surélevé sans interférence entre symboles.

Synchronisation temps et fréquence

Les horloges locales en émission et en réception ne sont pas synchronisées

⇒ Erreur en réception sur f_0

⇒ Offset de porteuse: résidu après transposition de l'ordre de $10^{-6}f_0$

Synchronisation temporelle: asservir les temps d'échantillonnage sur les "pics" des filtres de mise en forme

⇒ Imperfection des horloges ⇒ jitter temporel

Les deux synchronisations se font sur les séquences de synchronisation et les séquences pilotes

En sortie de synchronisation, le signal est échantillonné à 1 échantillon par symbole.

Egalisation - détection

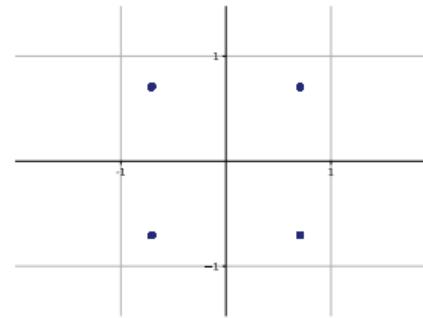
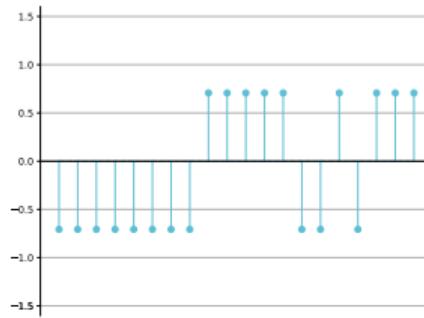
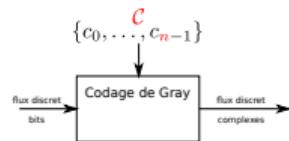
L'égalisation consiste à compenser le canal de propagation

- Estimation du canal sur les séquences pilotes (apprentissage)
- Inversion du canal estimé sur les blocs de données

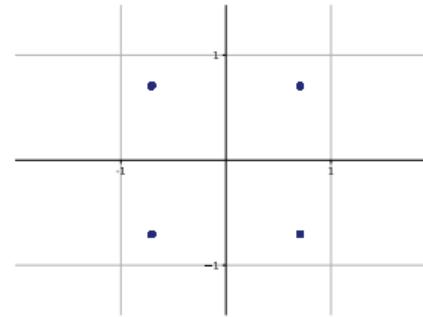
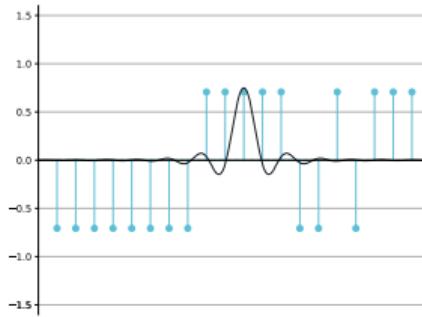
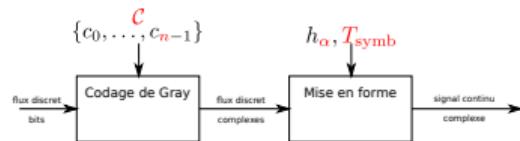
Détection: associer un symbole de la constellation à chaque échantillon.

Les deux peuvent se faire conjointement: algorithme de Viterbi

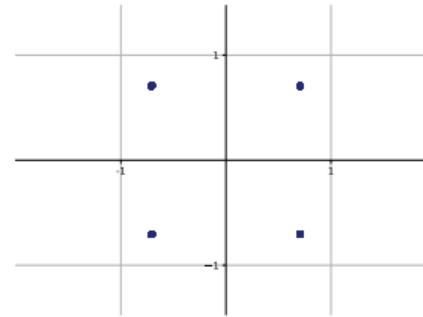
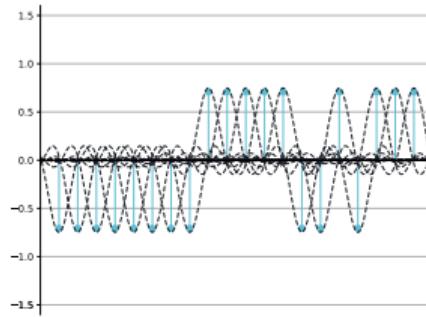
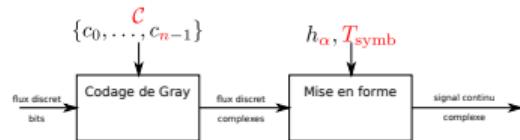
Résumé



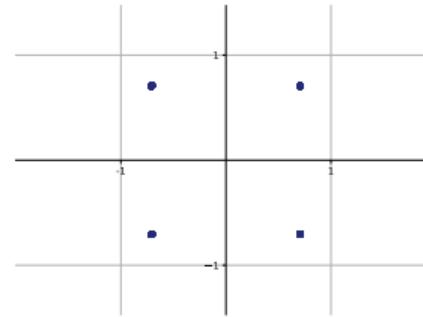
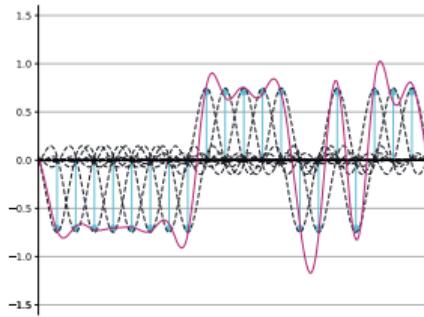
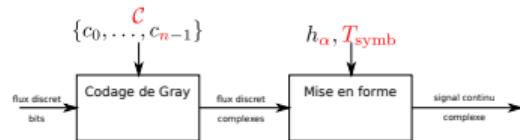
Résumé



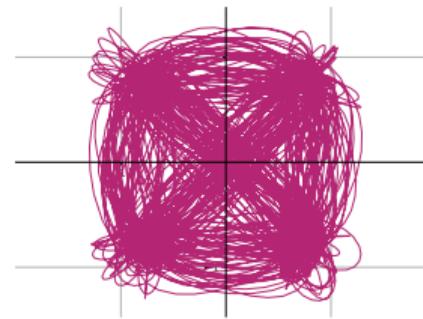
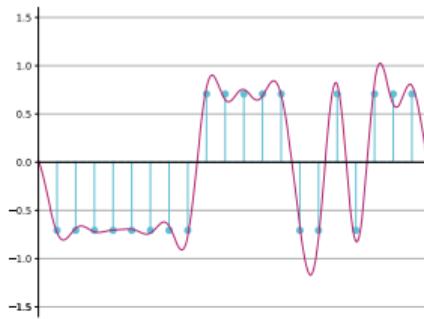
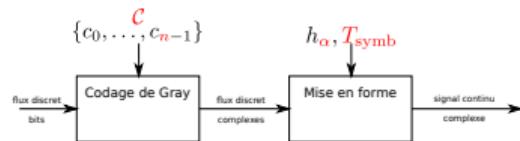
Résumé



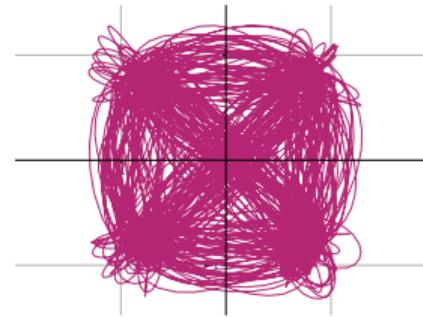
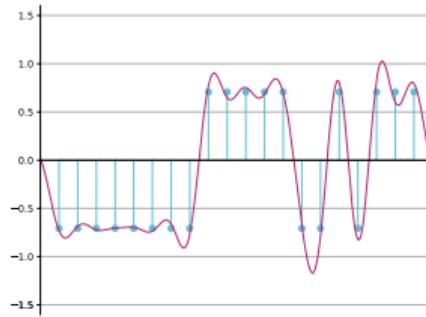
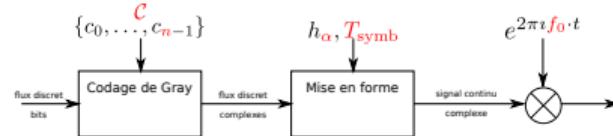
Résumé



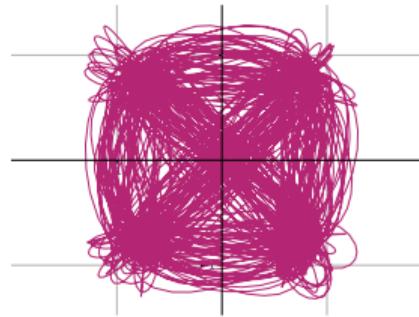
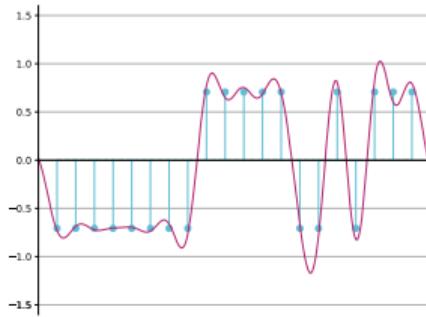
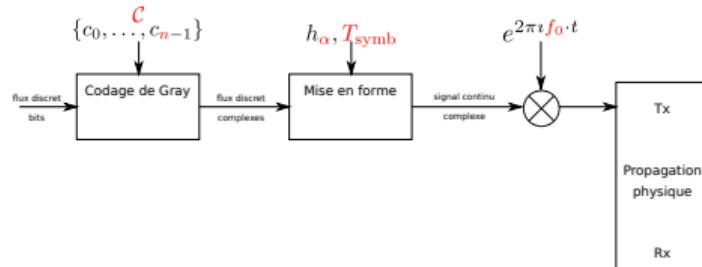
Résumé



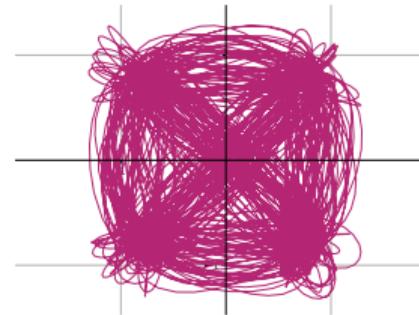
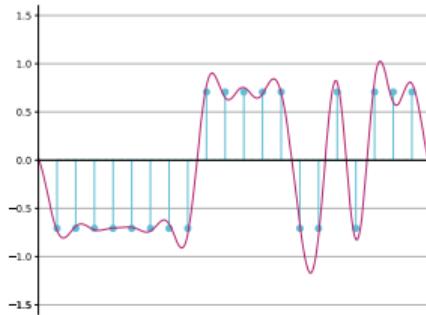
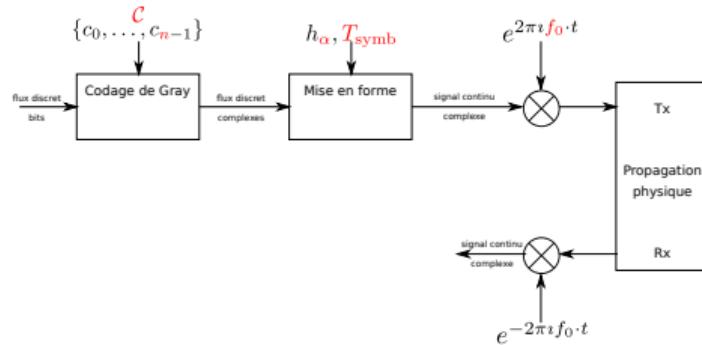
Résumé



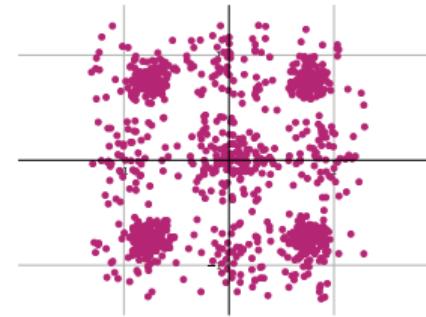
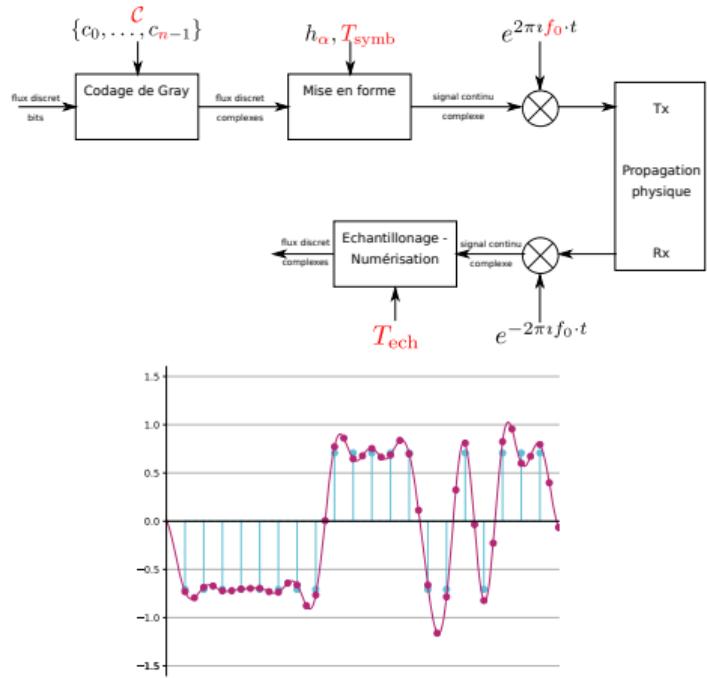
Résumé



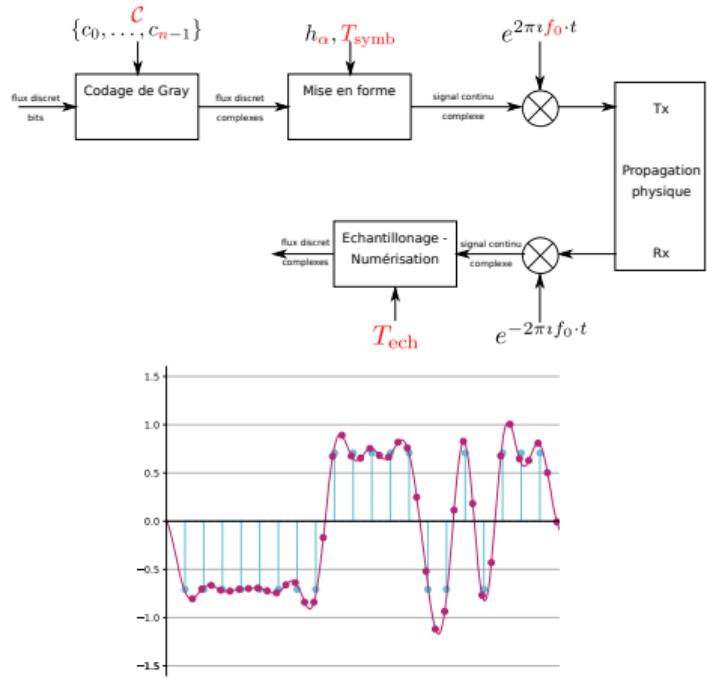
Résumé



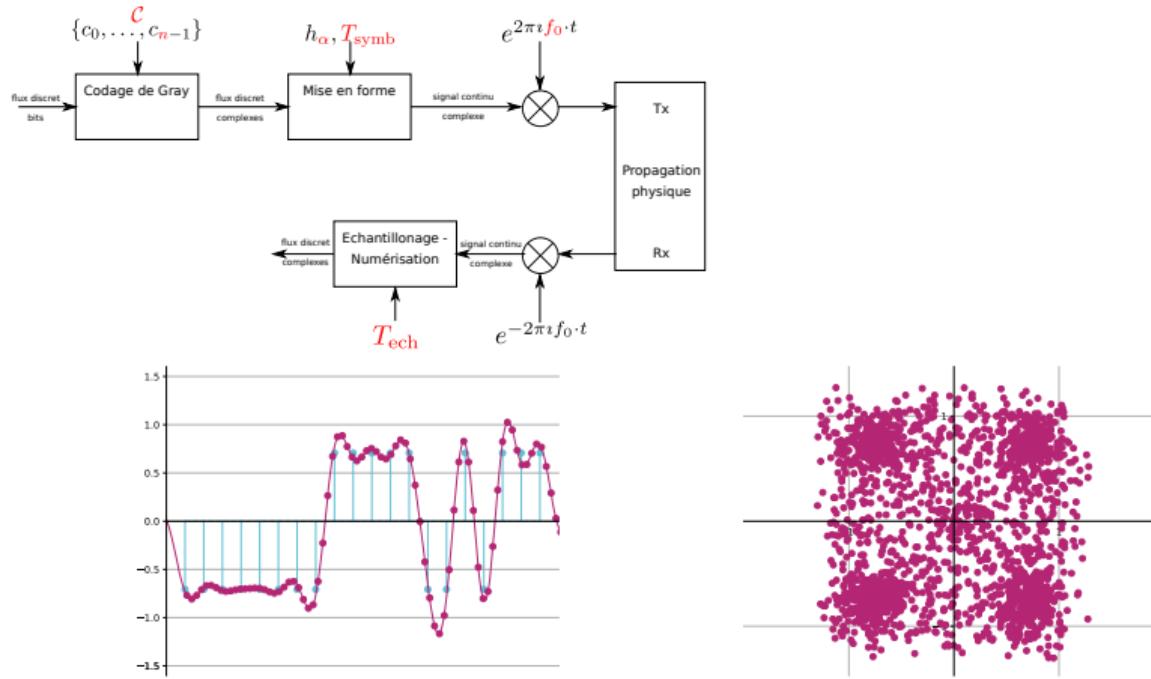
Résumé



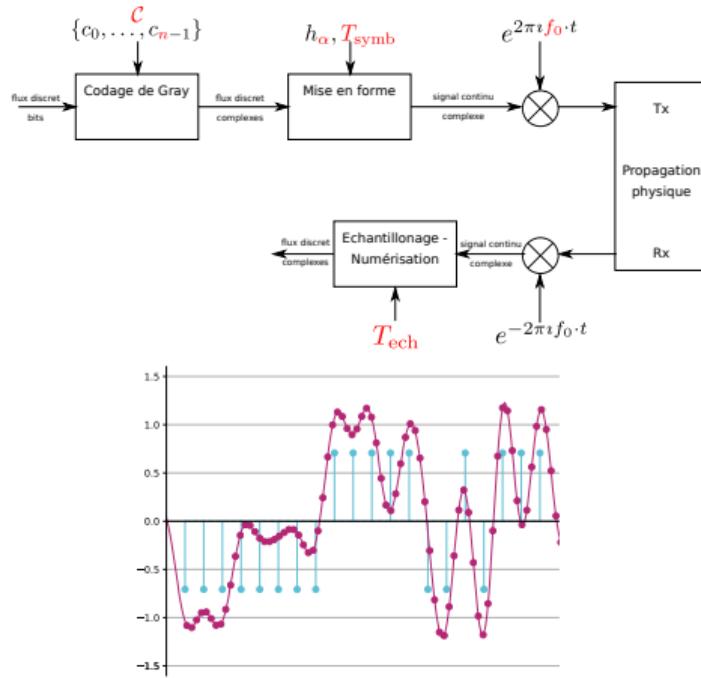
Résumé



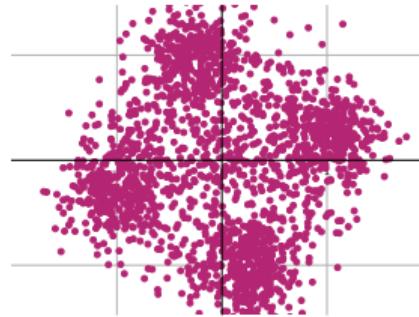
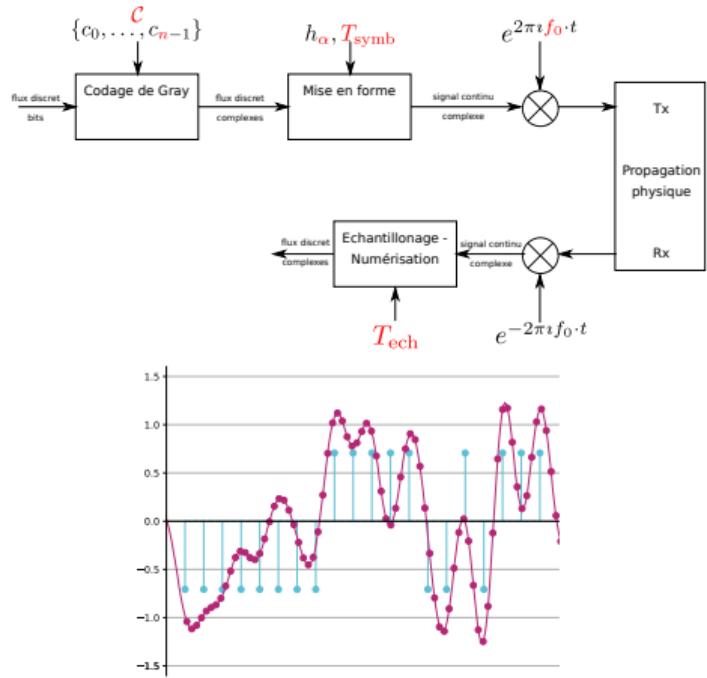
Résumé



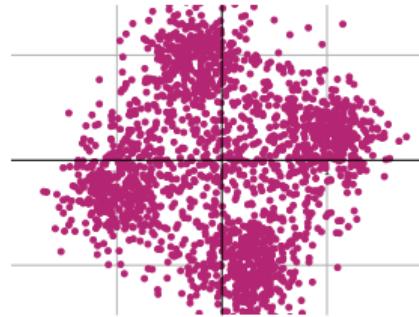
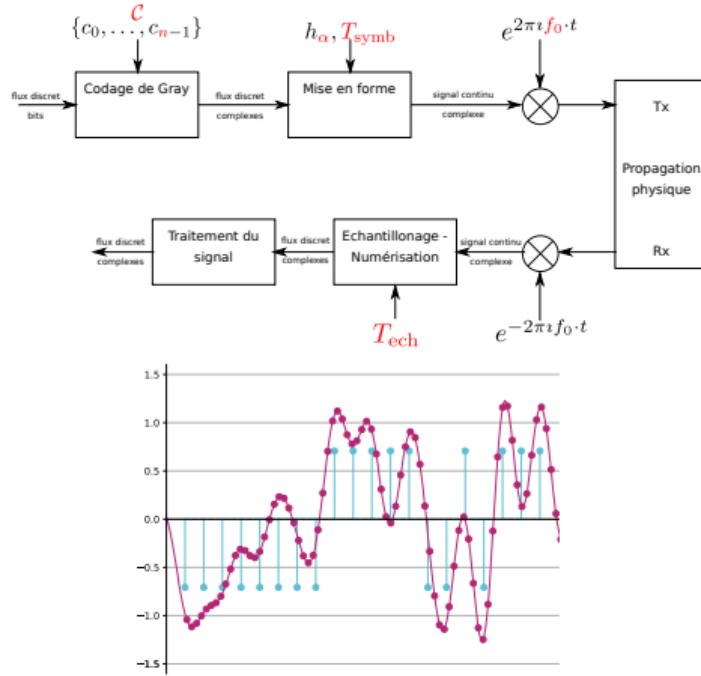
Résumé



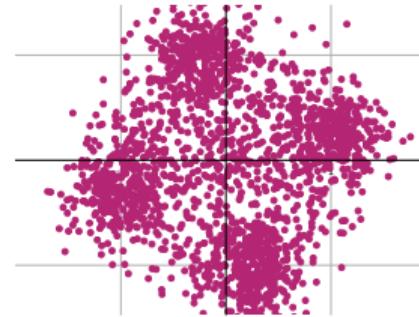
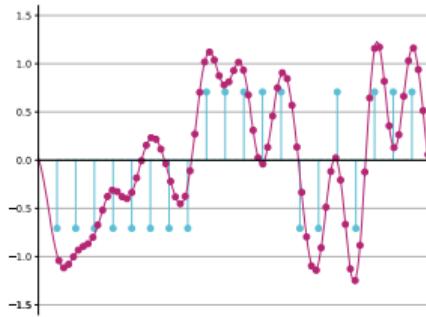
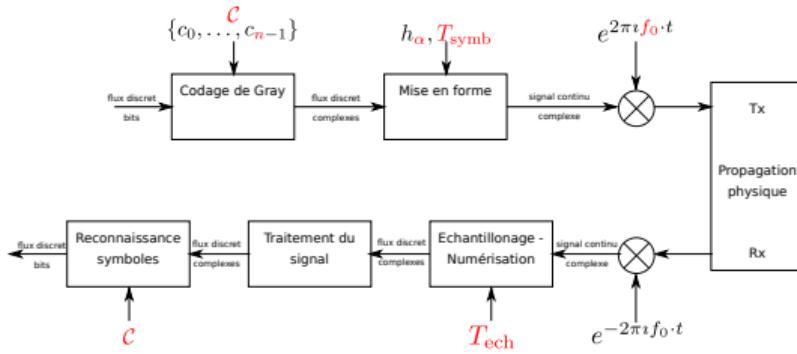
Résumé



Résumé



Résumé



cf cours radars

Rétroingénierie passive d'une scène électromagnétique.

A partir d'un enregistrement, inférer les éléments constituant la scène.

... et prendre des décisions.

cf cours radars

Rétroingénierie passive d'une scène électromagnétique.

A partir d'un enregistrement, inférer les éléments constituant la scène.
... et prendre des décisions.

SIGINT = ELINT \cup COMINT

Interception de communication:

- Nous ne sommes pas le récepteur légitime
- Nous ne connaissons pas les paramètres techniques (fréquence, largeur de bande, type de filtre, modulation etc.)
- Nous ne connaissons pas les séquences pilotes

Objectifs:

- Déetecter des communications
- Analyser les paramètres techniques de la communication
 - ⇒ Exemple: identifier la modulation
- Identifier le type d'émetteur
- Décoder la communication
- Mettre en perspective plusieurs analyses (remontée de réseau)